

# Een Delftse school?

Prof. dr. ir. A. Verruijt  
Emeritus hoogleraar TU Delft

## SAMENVATTING

Naar aanleiding van de presentatie van het boek met de belangrijkste artikelen van Professor De Josselin de Jong rees bij de redactie van *Geotechniek* de vraag of er wellicht sprake was, of is, van een Delftse School, waarbij de gedachte dan is dat het werk volgens die Delftse School zich zou moeten onderscheiden van het werk in de rest van de wereld. De redactie heeft aan Arnold Verruijt, emeritus hoogleraar Grondmechanica en opvolger van De Josselin de Jong, gevraagd daarover enige gedachten op te schrijven. Verruijt komt tot de conclusie dat er wel degelijk een Delftse school is.

## INLEIDING

De wereld is zo groot en divers dat er geen methode te vinden is die alleen in Delft wordt gebruikt. Bovendien is al het werk, ook van De Josselin de Jong, altijd rijkelijk voorzien van verwijzingen naar dat van eerdere onderzoekers, soms uit Delft, maar meestal van elders. En toch, er valt toch wel wat te zeggen over een aantal kenmerken van het werk dat in Nederland door De Josselin de Jong, en veel van zijn leerlingen, gedaan is. En die kenmerken vindt men elders niet in die mate terug.

## STAPJE DIEPER

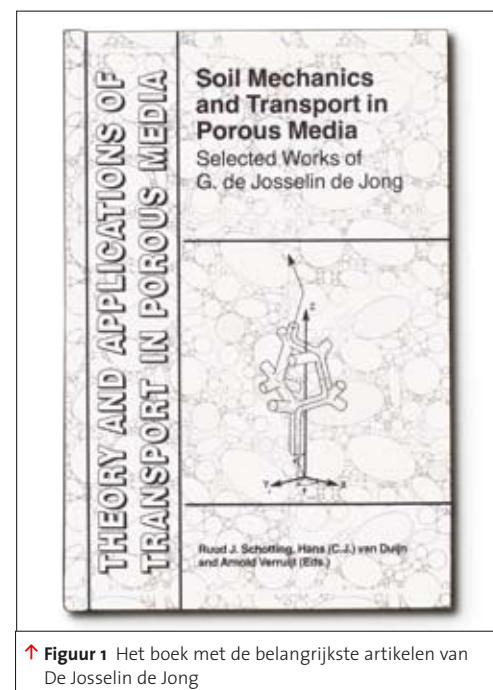
Het eerste, en misschien belangrijkste, kenmerk is dat veel werk ontwikkeld is door eerst een stapje dieper te kijken. Veel onderzoek in de geotechniek heeft het karakter van de bestudering van een verschijnsel in de praktijk, en dat dan in een formule beschrijven. Het ergste voorbeeld dat ik daarvan ken, is de formule van Peck voor de zettingen bij het boren van een tunnel (overigens met alle respect voor Peck als een groot ingenieur). Er wordt dan gesteld dat de zakking het grootst is juist boven de tunnel, en op het oneindige is er geen zetting. Daaraan voldoet de Gauss-verdeling, en als men dan de spreiding daarvan niet voorspelt, maar bepaalt uit de gemeten zettingen, heeft men een formule die heel goed klopt. Ik wil het graag geloven, maar ben er niet erg van onder de indruk. Liever zie ik een studie waarin geprobeerd wordt een verschijnsel te ontrafelen door te bestuderen wat de fysische achtergrond ervan is. Dat betekent in de grondmechanica of

grondwatermechanica dan vaak een studie op het niveau van de grondeeltjes (de korrels) zelf, en de poriën daartussen.

## DISPERSIE

Een mooi voorbeeld is de ontwikkeling van de beschrijving van het verschijnsel dispersie, dat is het transport van een verontreiniging door stromend grondwater. Toen dat in de jaren 50 van de vorige eeuw als onderwerp van studie naar voren kwam, door het belang van de verspreiding van verontreinigingen, kwam men al gauw tot de gedachte dat dit wel erg veel leek op diffusie, en daar waren in de fysica mooie formules voor ontwikkeld. Voor dispersie hoefde je dan alleen maar de diffusiecoëfficiënt te vervangen door een andere factor, de dispersiecoëfficiënt, en die moest je dan gaan meten door proeven te doen. De Josselin de Jong zag in dat dispersie misschien toch wat anders was dan diffusie, en dat het dan goed was om te proberen te beschrijven wat er zich afspeelt in een stelsel van poriën waar water door stroomt, met medeneming van kleine deeltjes verontreiniging. Diffusie kan die deeltjes door het water verspreiden, maar belangrijk is dat het water om de korrels heen moet stromen, en zo kan het ene deeltje links om een korrel worden gevoerd, en het andere deeltje rechts om die korrel. En dan kan een van die deeltjes in een kanaaltje terecht komen waarin het water langzaam stroomt, terwijl een ander deeltje in een kanaaltje komt waarin het water juist heel snel stroomt, door de oriëntatie van dat kanaaltje of door de afmetingen ervan. Zo ontstaat

het effect dat ook optreedt bij het verlaten van een stadion, waarbij twee vrienden net naar een verschillende uitgang worden gestuwd, waarbij de ene uitgang wijder is dan de andere, zodat de ene groep veel vlugger opschiet als de andere. Men verliest elkaar uit het zicht, maar in de breedterichting is men slechts weinig van elkaar verwijderd. Wat je dan ook moet doen is dat de snelste buiten het stadion gewoon moet blijven staan, dan komt de ander na enige tijd vanzelf weer naast hem uit. Wat het betekent, is dat de verspreiding in de richting van de stroming veel groter is dan de zijdelingse spreiding.



↑ **Figuur 1** Het boek met de belangrijkste artikelen van De Josselin de Jong

**BROWNSE BEWEGING**

De Josselin de Jong was bovendien nooit te beroerd om eens op te zoeken hoe de mensen die uit het principe van de Brownse beweging de grootte van de diffusiecoëfficiënt hadden afgeleid (Einstein, Chandrasekhar) dat nu eigenlijk hadden uitgerekend. Dat leidde tot een publicatie met veel waarschijnlijkheidsrekening, en lastige wiskunde, maar het resultaat was heel mooi: de dispersiecoëfficiënten in longitudinale en transversale richting bleken te kunnen worden geschreven als  $D_L = a_L v$  en  $D_T = a_T v$ , waarin  $v$  de gemiddelde snelheid van het water is, en  $a_L$  en  $a_T$  twee constanten zijn, van de orde van de grootte van de korrel diameter, en  $a_L$  veel groter dan  $a_T$ , bijvoorbeeld  $a_L / a_T = 8$ . Dat is nogal wat, doordat nu bekend is hoe groot de dispersiecoëfficiënten zijn, en hoe ze afhangen van de basisparameters: de korrelgrootte en de snelheid van het water. Dat het klopte, werd ook nog bewezen door een serie proeven, met mooie foto's van verspreidingszones. Niet iedereen geloofde het allemaal direct, vooral niet de mensen die al eerder in publicaties hadden gesteld dat het effect in alle richtingen hetzelfde was, maar na betrekkelijk korte tijd kwam het allemaal goed, vooral door toedoen van Jacob Bear, uit Haifa, die in zijn boeken op iets andere, maar in wezen equivalente, wijze de resultaten van De Josselin de Jong bevestigde. En tegenwoordig is dit allemaal algemeen aanvaarde standaardkennis. Interessant is misschien nog op te merken dat in de eerste publicaties van De Josselin de Jong over dispersie verwezen wordt naar H. Kramers, in oktober 2006 overleden. Dat was een fysicus, hoogleraar in Delft, de grondlegger van het vak Fysische Transportverschijnselen, en ook een autoriteit in het afleiden van macroscopische grootheden uit het gedrag op kleinere schaal. Misschien komt het daar wel allemaal vandaan.

**DOUBLE SLIDING**

Veel van het andere werk van De Josselin de Jong heeft een soortgelijk karakter. Zo probeerde hij het kruipgedrag van grond af te leiden uit de verschijnselen op het niveau van de korrel. Maar waarschijnlijk zijn belangrijkste werk is de ontwikkeling van een model voor de plastische vervormingen van een korrelachtig materiaal, ook op basis van het gedrag op microscopische schaal, althans de schaal van de korrels. Dit leidde tot het zogenaamde "double sliding, free rotating model", dat gebaseerd is op de gedachte dat plastisch vervormen alleen optreedt als de schuifspanning op een



↑ **Figuur 2** Van links naar rechts: Fokkema, Van Duijn, De Josselin de Jong en Barends.

Foto: Freek van Arkel

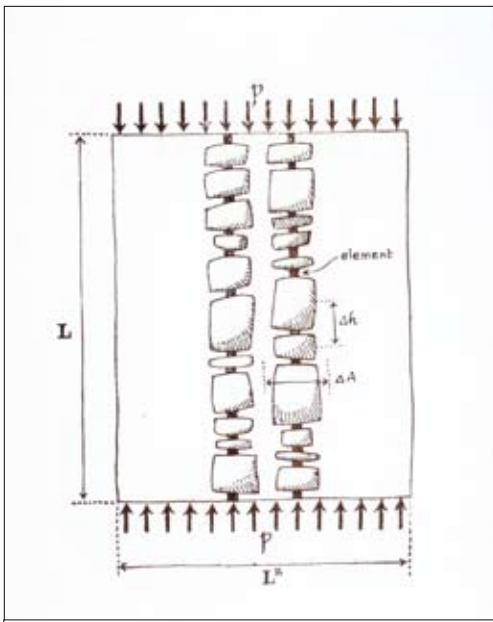
**De Josselin de Jong in het zonnetje**

Op woensdagmiddag 30 augustus 2006 werd Prof. Gerard de Josselin de Jong, de grand old man van de Nederlandse grondmechanica, door zijn leerlingen uitgebreid in het zonnetje gezet. In de jaren vijftig van de vorige eeuw was Josselin een pionier op het gebied van zowel de grondmechanica als de geohydrologie. Zijn ideeën strookten niet altijd met de gevestigde orde en het gevolg is dat veel van zijn publicaties minder aandacht hebben gekregen dan ze verdienen. Drie van zijn leerlingen – Arnold Verruijt, Hans van Duijn en Ruud Schotting – namen daarom het initiatief om een selectie te maken van de meest significante publicaties en daar een boek van te maken. Het eerste exemplaar van die 350 pagina's dikke bundel, die na monnikenwerk van vooral Schotting tot stand kwam, werd op de bijeenkomst aan "Jos" uitgereikt.

Drie sprekers luisterden de bijeenkomst op. Prof. Verruijt, opvolger van Josselin als hoogleraar Grondmechanica aan de TU Delft na diens emeritaat in 1980, zette Josselin in historisch perspectief. De basisprincipes van de grondmechanica werden geformuleerd in de eerste helft van de twintigste eeuw door de generatie van Terzaghi, met als cruciale formule dat de grondspanning de som is van de korrelspanning en de waterspanning. Het geniale van die gedachte, aldus Verruijt, is dat het porievolume er niet toe doet. Bij de generatie van direct na de oorlog, waar Josselin toe behoort, kwam de uitwerking van die gedachten aan de orde. In het denken van Josselin stond visualisatie centraal en dat is te zien aan de vele, vaak prachtige handgetekende figuren in de artikelen. Daarnaast was Josselin zeer geïnteresseerd in de experimentele kant van de grondmechanica. Uiteindelijk ging het hem er om de werkelijkheid te beschrijven, een model was voor hem geen doel op zich. Revolutionair was zijn denkbeeld dat bij plastische vervorming de snelheidsvector niet noodzakelijk parallel aan de spanning hoeft te staan. De gevestigde orde dacht daar heel anders over, en het heeft decennia geduurd voordat de bijdrage van Josselin hierin op waarde geschat werd.

De tweede spreker was Prof. Hans van Duijn, destijds werkzaam in Delft en nu rector magnificus bij de TU Eindhoven. Hij beschreef Josselins loopbaan ná diens emeritaat in 1980. Er waren nog zoveel interessante problemen dat er van pensionering eigenlijk geen sprake kon zijn, en Wiskunde verleende Josselin graag de faciliteiten – eerst een kamer, later ook een secretaresse – om zijn wetenschappelijke werk voort te zetten. In deze tijd was dispersie in grondwaterstroming het grote onderwerp van Josselin. Een omstreden begrip, maar ook hier begint nu het inzicht door te dringen dat de ideeën van Josselin heel wat meer in zich hadden dan destijds werd geaccepteerd.

Prof. Jacob Fokkema, rector magnificus van de TU Delft besloot de sprekersrij met een filosofisch verhaal over het belang van coryfeeën als Josselin en mocht Josselin het eerste exemplaar van het boek overhandigen. In zijn dankwoord stuurde Josselin alle hulde voor het samenstellen van het boek nog even naar Ruud Schotting 'want die heeft het echte werk gedaan, en alle copyrights geregeld en zo.' Al met al was het een geslaagde middag voor en ter ere van een 91-jarige coryfee.



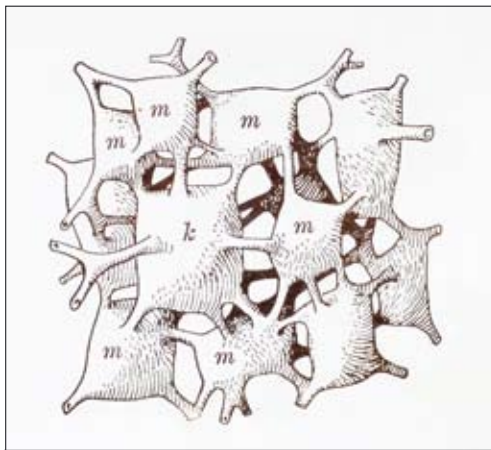
↑ **Figuur 3** De belasting wordt primair overgedragen door elementen die zich ter plaatse van de verticale contactpunten tussen de korrels bevinden (illustratie: De Josselin de Jong)

zeker vlakje gelijk is aan de maximaal mogelijke waarde zoals lang geleden geformuleerd door Coulomb, en dan bestaat uit afschuiven langs een vlak in die richting. Er zijn twee zulke glijvlakken, met een onderlinge hoek van  $90^\circ - \varphi/2$ . Dat lijkt allemaal heel redelijk en bijna triiviaal, maar vooral de omstandigheid dat het afschuiven in de beide richtingen van verschillende grootte kan zijn (doe maar eens een triaxiaalproef: de ene keer schuift het monster alleen naar links af, een andere keer alleen naar rechts, en de volgende keer in beide richtingen een beetje) leidde tot consequenties die tot veel discussie aanleiding hebben gegeven. Bovendien stelt het model dat bij bezwijken geen volumeverandering optreedt, of, in latere versies, eventueel een zekere betrekkelijk kleine volumeverandering. Er waren twee belangrijke controverses: in het eenvoudigste geval, zonder dilatantie, is het model in strijd met het principe van Drucker, dat zo'n furore had gemaakt in de plasticiteitstheorie van metalen (die hebben alleen cohesie, geen wrijvingshoek). Volgens dat principe kon men namelijk de relatieve grootte van de plastische vervormingen bepalen door de bezwijkvoorwaarde te differentiëren naar de overeenkomstige spanningscomponent. Als dat voor grond zou gelden, zou bij alle plastische vervormingen van grond een voortdurende uitzetting van het materiaal optreden (met een dilatatiehoek gelijk aan de wrijvingshoek). Voor een grondmechanicus is dat duidelijke onzin, maar voor iemand uit de theoretische mechanica was het

moeilijk te aanvaarden dat er iets mis was met Drucker's principe. Inmiddels is het punt opgelost. Stelt men dat grond een "niet-associatieve vloeiregel" heeft, dan klopt het weer allemaal, en kan de grondmechanica worden ingepast in de mechanica van continua.

**MATHEMATISCH BEWIJS EXPERIMENTEEL WEERLEGD**

Moeilijker lag het met een andere consequentie van het double sliding model, namelijk dat bij bezwijken de hoofdrichting van de reksnelheid niet samenvalt met de hoofdrichting van de spanning, maar daarmee een hoek kan maken, van maximaal  $\varphi/2$ . Uit fundamentele hoek kwamen daar bezwaren tegen, weer gebaseerd op een algemeen principe uit de mechanica van continua, namelijk dat voor een isotroop materiaal de hoofdrichtingen van reksnelheid en spanning moeten samenvallen. En daar was mathematisch bewijs voor! Gelukkig bleek dat dat bewijs al in het begin fout loopt, omdat het namelijk gebaseerd is op de aanname dat er een éénduidig verband tussen spanning en rek moet zijn. En dat lijkt op het eerste gezicht heel redelijk, maar hoeft voor grond helemaal niet. Er kunnen immers bij dezelfde spanningstoestand verschillende vervormingen optreden, en een zelfde vervorming kan best bij verschillende spanningstoelstanden horen. Maar er zijn ook nog bezwaren aangevoerd door wetenschappers die alternatieve modellen presenterden, waarbij de rotatie niet vrij was, maar opgelegd werd. Gelukkig is dat ook allemaal weerlegd, eerst door proeven van De Josselin de Jong en Drescher, maar later ook door anderen, bijvoorbeeld door Savage en Lockner. Een double sliding model verklaart bijvoorbeeld heel mooi dat men bij een schuifproef op zand vaak nogal verschillende schuifsterktes vindt, afhankelijk van de oorspronkelijke horizontale



↑ **Figuur 4** Systeem van holtes verbonden door kanaaltjes (illustratie: De Josselin de Jong)

spanning. Een jaar of twintig geleden waren op een internationale conferentie alleen de Delftenaren niet verbaasd als Engelse collega's een wolk van resultaten van schuifproeven presenterden (meestal met de bedoeling om de superioriteit van de triaxiaalproef te bewijzen, maar daar gaat het nu niet om).

**DELFTSE SCHOOL**

Ook leerlingen van De Josselin de Jong (soms al van de tweede generatie) hebben de hierboven geïllustreerde Delftse methode gebruikt in hun werk. Zo ontwikkelde Strack (met Cundall) een model om op basis van het onderlinge gedrag van twee elkaar rakende bolletjes het gedrag van een hele korrelstapel te voorspellen, als je computer maar groot genoeg is. En de methode der analytische elementen voor grondwaterstroming, die Strack ontwikkelde, met nog een andere Delftenaar, Haitjema, is ook gebaseerd op een combinatie van het gedrag van een groot aantal in principe simpele basiselementen.

Een heel mooi voorbeeld is ook het model dat Sellmeijer ontwikkelde voor piping. Ook hij ging daarbij naar de basis terug: de stroming door een kanaaltje in de grond, en het evenwicht, of losraken, van een korrel op de overgang tussen grond en water. En de theoretische voorspellingen zijn bevestigd door experimenteel onderzoek.

Het aantal voorbeelden is nog met vele uit te breiden: Barends, Soerjadi (de vader van Wibi), Uffink en Wichman in de grondwatermechanica en consolidatie; Vermeer, Molenkamp, Teunissen en diverse anderen in de plasticiteit van grond; Den Haan voor kruip; Van der Grinten, Smeulders, Hölischer en Cornejo in de gronddynamic, te veel om allemaal te noemen.

Veel van dat werk heeft al de karakteristieken van de Delftse school: beginnen met terug te gaan naar de basis, uitgaan van fysische basisprincipes, moeilijke wiskunde niet uit de weg gaan, en zorgen voor experimentele bevestiging.

En concluderend kan dus gesteld worden dat er wel degelijk een Delftse school is.

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 april 2007 naar de uitgever worden gestuurd